# 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术

凌禹1,2 蔡旭2

(1. 山西大同大学 电气工程系,山西 大同 037003;2. 上海交通大学 风力发电研究中心,上海 200240)

摘要:针对撬棒保护技术存在的双馈风电机组失控问题,提出了转子串电阻和直流侧卸荷电路协调控制的 故障穿越方案。该方案不仅能够保证双馈风电机组满足电网规范的穿越要求,同时也抑制了系统机组转速的过快 增加,从而有效地改善了机组的转速稳定性和瞬态行为。首先分析了转子串电阻的理论依据,评估了不同限 流电阻对机组瞬态特性的影响,选择了合适的电阻值,并分析了所提方案的工作原理。最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提方案的有效性进行验证。仿真结果表明,所提方案能保证双馈风电机组成功穿越低压故障, 且具有较好的转速稳定性和瞬态特性。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.005

# 0 引言

为了应对能源危机和环境恶化,世界各国正积极 地推动可再生能源的开发和利用,其中风力发电已成 为科研人员和商业企业关注的焦点。这是因为风能 是一种可靠的、无限的、可再生的电力供应源。

然而,大规模风电接入电网却给电网运行带来 了较大的挑战,即要想大规模的风电接入电网运行, 风电机组应保证具备故障穿越能力,甚至在故障切 除后向电网提供无功,从而支持电网电压恢复的能 力<sup>[12]</sup>。事实上,所有结构的风电机组都存在故障穿越 的问题,但由于双馈机组(DFIG)定子绕组直接与电 网相连,使其对电网扰动,尤其是电压跌落最敏感, 因此 DFIG 的故障穿越能力的提高也最具挑战性。 通常情况,电网电压突降将导致转子过电流,其幅值 可达额定值的 5~10 倍<sup>[3]</sup>。这主要是因为,当电网电 压跌落时,在 DFIG 的定子绕组中产生过电流,由于 定转子之间的磁耦合,同样在转子绕组和变换器中 流过较大的电流,从而造成变换器的损坏。

因此,如何进一步提高 DFIG 的故障穿越能力以 满足日益严格的电网规程要求,已成为当前研究的 热点问题。主动的故障穿越技术主要有基于传统矢 量控制技术改进的方案<sup>[4-6]</sup>、基于直接功率控制的方 案<sup>[7-8]</sup>、基于可靠控制技术的 H<sub>s</sub> 和 µ 分析方法设计 的全新的鲁棒控制器<sup>[9]</sup>以及非线性控制<sup>[10]</sup>。

然而,上述主动控制策略仅能满足电网电压跌落 程度较轻情况下的机组故障穿越要求。对于电压跌 落较严重的情况,由于转子侧自身能力的限制,不能 提供足够的控制电压去限制转子故障电流<sup>100</sup>。因此, 必须求助于被动的故障穿越技术来加强双馈风电

收稿日期:2013-08-13;修回日期:2014-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50907040)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50907040)

机组的故障穿越能力。

目前,最常用的一种被动故障穿越技术是撬棒 保护技术。起初,撬棒保护技术仅仅是通过"晶闸管 短路器"短路 DFIG 的转子绕组来保护机组本身,此 时机组需跳闸,脱离电网。然而,对于接入大规模风 电机组的电网而言,在电网电压故障时,大量风电机组 的跳闸将危及电力系统的安全运行。作为改进,一组 旁路电阻即撬棒电路,被接入转子电路,以限制转子 过电流。这种方法能够保证机组不间断并网运行,满 足现代电网对风电机组故障穿越能力的要求<sup>[11-15]</sup>。

然而,撬棒技术面临的最大问题是撬棒投入后, 转子侧变换器被封锁,DFIG处于失控的状态。有不 同的途径<sup>[13-15]</sup>可以减少撬棒的投入时间,从而减少 DFIG 的失控时间,如通过改善其控制策略、提高旁路 电阻的值等,但终究没有摆脱撬棒保护电路。

因此,本文建议采用一种可代替的方法即转子串 电阻 RSDR(Rotor Series Damping Resistor)<sup>10]</sup>的方 案来彻底解决该问题。由于文献[10]并未详细阐述 转子串电阻保护的相关信息,故本文详细分析了转 子串联电阻保护的理论依据,给出了限流电阻下限 的确定方法,通过仿真进一步研究了不同限流电阻 对机组瞬态特性的影响,为选择合适的限流电阻范围 提供参考,并仿真比较了撬棒电路和转子串电阻的差 别。最后,提出了转子串联电阻和直流侧卸荷电路协 调控制的故障穿越方案,并基于 PSCAD/EMTDC 专 业仿真软件,验证了所提方案的有效性。

## 1 系统描述

尽管双馈风电机组对电网电压故障较其他机型 更敏感,但由于其具有诸多优点<sup>16</sup>,尤其是在大功率 机组上,仍然是最受欢迎的风力发电结构之一。如图 1 所示,系统主要由风轮、齿轮箱、DFIG、背靠背连接



图 1 双馈风电机组并网运行结构框图

Fig.1 Block diagram of grid-connected DFIG wind turbine

的转子侧变换器 RSC(Rotor Side Converter)和网侧 变换器 GSC(Grid Side Converter)以及变换器保护 电路等组成。其中,电机的定子绕组与电网直接相连, 转子绕组通过背靠背变换器接入电网,以实现机组 四象限变速运行。

变换器的控制主要采用传统的矢量控制方法, 在正常电网条件下,其能够实现有功和无功功率的解 耦控制,控制性能优良。通常,网侧变换器的控制目 标是确保直流侧电压稳定,而转子侧变换器则负责 有功和无功功率控制。变换器保护电路是确保电网 电压故障情况下,变换器不至于被过电流和过电压 破坏。

# 2 转子串电阻技术分析及其控制

#### 2.1 转子串电阻技术理论依据

为了理解 DFIG 转子绕组串电阻对转子电流的 影响,首先需要分析转子动态数学模型。采用电动 机惯例,全部参数折算到定子侧,利用空间矢量的方 法,DFIG 在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型如下 所示<sup>[10]</sup>:

$$\boldsymbol{u}_{s} = \boldsymbol{R}_{s} \boldsymbol{i}_{s} + \frac{\mathrm{d} \boldsymbol{\psi}_{s}}{\mathrm{d} t} - \mathrm{j} \boldsymbol{\omega}_{s} \boldsymbol{\psi}_{s}$$
(1)

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{r}} = R_{\mathrm{r}} \boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t} - j(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}$$
(2)

$$\boldsymbol{\psi}_{s} = L_{s} \boldsymbol{i}_{s} + L_{m} \boldsymbol{i}_{r}$$
(3)

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}} = L_{\mathrm{m}} \boldsymbol{i}_{\mathrm{s}} + L_{\mathrm{r}} \boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} \tag{4}$$

其中,**u、i、ψ、R、L、ω**s、ωr分别为电压、电流、磁通、电阻、电感、同步角频率和转子角频率;下标 s、r、m分别代表定子量、转子量和互感。

根据式(1)—(4),转子动态数学模型如下:

$$L_{\rm ro} \frac{\mathrm{d}\mathbf{i}_{\rm r}}{\mathrm{d}t} = -R_{\rm ro}\mathbf{i}_{\rm r} + j(\boldsymbol{\omega}_{\rm s} - \boldsymbol{\omega}_{\rm r})L_{\rm ro}\mathbf{i}_{\rm r} - \mathbf{E} + \mathbf{u}_{\rm r}$$
(5)

其中, **E**为同步旋转坐标系下在转子绕组中感应的 反电动势; L<sub>ro</sub>、 **R**<sub>ro</sub>分别为转子瞬态电感和电阻。

$$\boldsymbol{E} = \frac{L_{\rm m}}{L_{\rm s}} \left( \boldsymbol{u}_{\rm s} + j \boldsymbol{\omega}_{\rm r} \boldsymbol{\psi}_{\rm s} - \frac{R_{\rm s}}{L_{\rm s}} \boldsymbol{\psi}_{\rm s} \right) \tag{6}$$

$$L_{\rm r\sigma} = L_{\rm r} + \frac{L_{\rm m}^2}{L_{\rm s}} \tag{7}$$

$$R_{\rm r\sigma} = R_{\rm r} + (L_{\rm m}/L_{\rm s})^2 R_{\rm s} \tag{8}$$

从式(8)可以看出,只要改变转子回路电阻,就 可改变转子瞬态电阻,从而抑制转子故障电流幅值, 加快直流分量的衰减。正是基于这一基本原理,建议 采用转子串电阻来改善DFIG 在电网电压故障情况 下的转子电流动态响应。

#### 2.2 转子串联电阻模型

按照上文分析,如图1所示,在转子绕组和变换 器之间串入一组电阻以限制电网电压跌落期间转子 绕组流过的故障电流和过电压。其主要由电阻和旁 路开关组成,等效模型如图2所示。在正常的电网条 件下,旁路开关处于闭合状态,衰减电阻被旁路,转 子电流流经路径1,即转子电流不流过衰减电阻。当 DFIG遭受电网电压跌落时,旁路开关打开,电阻 R<sub>ISOR</sub> 被串入转子绕组,转子电流从路径2流过,流经衰减 电阻。按照式(8),在电网故障期间转子串电阻保护 启动后,等效的转子瞬态电阻变为:

$$R_{\rm r\sigma} = R_{\rm r} + (L_{\rm m}/L_{\rm s})^2 R_{\rm s} + R_{\rm RSDR}$$

$$\tag{9}$$

显然,转子瞬态电阻增加,从而限制了转子绕组中的过电流,同时也能够改善DFIG 电磁转矩振荡和 其瞬态响应。



图 2 转子串电阻保护模型 Fig.2 Model of RSDR protection

#### 2.3 转子串联电阻值范围确定

目前,转子串电阻保护阻值的确定仍没有详细的 报道,完全可以借鉴撬棒保护电路旁路电阻值范围 确定的方法,即其阻值同样需要足够大以确保转子 故障电流在规定的范围内,同时转子电压也不能超 过变换器的限值。

首先,要分析和估算电压故障期间转子电流的最 大值。已有文献从不同的侧面分析了 DFIG 故障期 间转子电流动态特性<sup>[16-18]</sup>,并给出了近似的转子电 流最大值的表达式。下面仅简单地阐述。

利用式(3)和式(4),可以分别得出定子和转子 电流的表达式:

$$\boldsymbol{i}_{s} = (L_{r}\boldsymbol{\psi}_{s} - L_{m}\boldsymbol{\psi}_{r})/(L_{r}L_{s} - L_{m}^{2})$$
(10)

$$\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} = (L_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}} - L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}) / (L_{\mathrm{r}}L_{\mathrm{s}} - L_{\mathrm{m}}^{2})$$
(11)

考虑到  $L_s = L_{ls} + L_m, L_r = L_{lr} + L_m, 其中 L_{ls}, L_{lr}$ 分别为 定、转子漏感,且  $L_m \gg L_{ls}$ 和  $L_m \gg L_{lr}$ ,上述两式可以 分别简化为.

$$\boldsymbol{i}_{s} = (\boldsymbol{\psi}_{s} - \boldsymbol{\psi}_{r}) / (L_{lr} + L_{ls})$$
(12)

$$i_{r} = (\boldsymbol{\psi}_{r} - \boldsymbol{\psi}_{s}) / (L_{lr} + L_{ls})$$
(13)  
根据式(12)和式(13),可以得出:

$$\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}} = -\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} \tag{14}$$

借鉴文献[18]中关于撬棒保护电路旁路电阻值的确定,当衰减电阻串入转子绕组且忽略定转子绕组电阻时,DFIG 在机端短路时的定子最大电流 *I*<sub>s\_max</sub>可近似表示为.

$$I_{\rm s\_max} \approx 1.8 U_{\rm s} / \sqrt{X_{\rm s}^2 + R_{\rm RSDR}^2} \tag{15}$$

其中,X<sub>s</sub>为电机定子瞬时电抗;U<sub>s</sub>为电机定子电压 有效值。

按照式(14),也可以近似认为短路故障时 DFIG 的最大转子电流与定子最大短路电流一致。

按照上述电阻值应满足的条件,其要限制转子故 障电流在安全范围内,即短路故障时的最大转子电流 *I*<sub>r max</sub>必须满足下式:

$$I_{\rm r\_max} < I_{\rm r\_lim}$$
(16)

其中, I<sub>r\_lim</sub>为转子电流的安全限值。

根据式(15)和式(16),可求得所需电阻的最小 值为:

$$R_{\rm RSDR\ min} = \sqrt{3.24U_{\rm s}^2/I_{\rm r\_lim}^2 - X_{\rm s}^2}$$
(17)

同时,要求转子电压不能超过转子侧变换器允许的最大安全电压限值 U<sub>lim RSC</sub>,即:

$$U_{\rm r} \leq U_{\rm lim\_RSC}$$
 (18)

## 2.4 转子串电阻保护与撬棒保护对比分析

与转子侧撬棒保护电路相比,转子串电阻保护投 入后不需要封锁转子侧变换器,DFIG仍在控制之中, 因此,转子串电阻保护的投入和退出对系统负面影 响较小,同时也有利于在故障期间采用其他主动故障 穿越技术一起改善双馈风电机组的故障穿越能力。

基于电力系统专业仿真软件 PSCAD/EMTDC, 对比分析了转子串电阻保护和撬棒保护改善机组故 障穿越性能的能力。为了具有可比性,在仿真中撬棒 保护电路和转子串电阻保护控制策略均采用定时器 方式。仿真条件为:机组运行在额定工况附近,电压 在 10 s 时从 100% $U_{\rm N}$ 跌落至 20% $U_{\rm N}$ ,持续 625 ms,撬 棒旁路电阻和转子串电阻阻值一样。电机参数为: 额定容量 $P_{\rm N}$ =2MW,额定电压 $U_{\rm N}$ =690V,f=50 Hz, $R_{\rm s}$ = 0.004 88 p.u., $L_{\rm h}$ =0.138 6 p.u., $R_{\rm r}$ =0.005 49 p.u., $L_{\rm h}$ = 0.149 3 p.u., $L_{\rm m}$ = 3.9 p.u.,惯性时间常数H=3.5 s, 匝 间比为 0.45。

图 3 给出了上述 2 种保护方案下 DFIG 转子电流、网侧有功和无功功率、角速度以及电磁转矩(均 为标幺值,后同)的波形。从图中可以看出,尽管使用 电阻值相同,但由于 2 种保护方案接入转子绕组的方 式不同,导致 DFIG 故障期间的系统响应也不尽相同。

由图 3(a)可以看出,在转子串电阻保护方案中, 其最大振幅较小,并且由于电机仍处于可控的状态,





转子电流并未一直衰减下去,而是维持了一定的幅 值。由图 3(b)可以看出,在转子串电阻保护方案中, 故障期间网侧有功损失更少,效率更高。由图 3(c)可 以看到,在转子串电阻保护方案中,无功的波动幅度 也比撬棒保护的小,且并未像撬棒保护电路一样向 电网吸收无功功率。由图 3(d)可以看到,在转子串 电阻保护方案中,角速度在故障期间的加速缓减,提 高了系统的稳定性。由图 3(e)可以看到,转子串电 阻保护方案的电磁转矩振荡幅度比撬棒保护的小, 从而有利于延长双馈风电系统齿轮箱的使用寿命。

总之,转子侧串电阻保护方案解决了撬棒保护 中电机失控的问题,而正是由于这一点,其故障期间 的暂态性能比撬棒保护的好,功率损耗更小,效率也 更高。

#### 2.5 转子串电阻对机组暂态特性的影响

前文从理论上分析了转子串电阻阻值下限的确

定方法,但限流电阻上限值暂时无法给出,因此,为 了大致确定限流电阻阻值的范围,需通过仿真来评 估不同阻值对双馈系统瞬态性能的影响,从而为选 择电阻值提供参考。利用电力系统专业仿真软件 PSCAD/EMTDC进行了仿真验证。具体仿真条件与 第 2.4 节相同。

图 4 给出了上述仿真条件下的转子电流、网侧 有功功率、网侧无功功率、电磁转矩、角速度和直流 侧母线电压的波形。从图中可以看出,随着阻值的 增加,上述各变量振荡幅度均减少。



图 4 不同转子串联电阻时的转子电流 Fig.4 Rotor current for different RSDRs 然而,并不是选择的电阻越大越好。从有功输出 和无功支撑考虑,电阻越小越好;从直流侧电压考虑, 电阻也不能太大,否则母线电压会跌落太大。因此, 在确保转子电流和电磁转矩振荡在限值范围内的前 提下,尽量选择小的电阻更有利于系统的暂态性能。

#### 2.6 协调的故障穿越方案

事实上,转子串电阻的控制策略对电阻值选取 也有重要影响。同时,对于 DFIG 而言,其保护电路 本身也是一种扰动。因此,要尽量减少保护的投入时 间,从而最小化对系统的负面影响。

通常,转子电流限值是2p.u.,按照图4(a)所示, 转子串电阻阻值大约为0.2p.u.时,就能满足这一要求。然而,此时直流侧电压却不能满足其1.2倍额定 值的限值要求<sup>[10]</sup>。

因此,本文提出如图 1 所示的转子串电阻和直 流侧卸荷电路协调的方案来加强 DFIG 的故障穿越 能力,同时改善其故障期间的瞬态性能,尤其是机组 转速的稳定性。

当转子故障电流大于其限值 2 p.u. 时,比较器输 出低电平,旁路开关打开,转子串电阻保护的电阻串 入转子绕组以限制转子故障电流,否则旁路开关闭 合,限流电阻被旁路。当直流侧母线电压高于其限 值时,比较器输出高电平,功率开关打开,卸荷电路 投入以卸掉多余能量,以维持直流母线电压稳定,否 则输出低电平,功率开关闭合,卸荷电路退出运行。

# 3 仿真结果和分析

为了验证所提的故障穿越方案的有效性,利用 电力系统专业仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行了仿真 研究。具体仿真条件同第 2.4 节。经过以上综合分 析,转子串电阻阻值取 0.5 p.u.,卸荷电阻取 0.01 Ω。

图 5 展示了传统控制策略和所提策略下双馈 风电系统的故障穿越能力。

由图 5 所示的结果可知,所提策略能够确保转子 故障电流和直流侧母线电压分别在 2 p.u. 和 1.2 倍额





Fig.5 FRT capability of DFIG wind turbine

定值之下,确保变换器不损坏,成功使机组穿越低电 压故障。同时发现,有功、无功的波动有较大的改善, 电磁转矩的振荡幅度也很快被衰减到 2.5 p.u.<sup>[19]</sup>以 内。但值得注意的是,电网电压故障清除后,无功功 率和电磁转矩振荡幅度较故障发生时大。

#### 4 结论

由于撬棒保护电路投入后电机处于失控的状态,不利于机组的稳定运行,因此本文采用转子串电阻的措施代替撬棒电路。通过仿真评估,转子串电阻保护具有比撬棒保护更好的暂态性能,对系统的负面影响更小,尤其是机组转速稳定性更好。

考虑到仅采用转子串电阻保护未能确保直流侧 母线电压在限值范围内,提出采用转子串电阻和直流 侧卸荷电路相结合的方案来改善双馈风电机组的 故障穿越能力,并且利用电力系统仿真软件 PSCAD/ EMTDC 验证了所提方案下双馈风电机组能够穿越 电网电压故障。

总之,所提方案不仅能够保证双馈风电机组满足 电网规范的穿越要求,同时也很好地改善了机组的 瞬态性能,是一种值得推广和深入研究的穿越方案。

#### 参考文献:

- [1] ERLICH I, WINTER W, DITTRICH A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the Germany transmission system[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2006:18-22.
- [2] 王继东,张小静,杜旭浩,等.光伏发电与风力发电的并网技术标 准[J].电力自动化设备,2011,31(11):1-7.

WANG Jidong, ZHANG Xiaojing, DU Xuhao, et al. Standards of grid-connection technology for photovoltaic and wind power generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 1-7.

- [3] YANG J,DORRELL D G,FLETECHER J E. A new converter protection scheme for doubly-fed induction generators during disturbances [C] // 34th IEEE Annual Conference on Industrial Electronics, IECON. Orlando, FL, USA: IEEE, 2008:2100-2105.
- [4] 胡家兵,孙丹,贺益康,等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机 建模与控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):21-26.
  HU Jiabing,SUN Dan,HE Yikang,et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(8):21-26.
- [5] 蔚兰,陈国呈,宋小亮,等.一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J].电工技术学报,2010,25(9):170-175.
   YU Lan,CHEN Guocheng,SONG Xiaoliang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(9):170-175.
- [6] XIANG D,RAN L,TAVNER P J,et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ridethrough[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (3):652-662.
- [7] ZHI Dawei, XU Lie. Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):110-118.
- [8] NIAN Heng,SONG Yipeng,ZHOU Peng,et al. Improved direct power control of a wind turbine driven doubly fed induction generator during transient grid voltage unbalance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011,26(3):976-986.
- [9] RATHI M R, MOHAN N. A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating in weak grid [C]//31st Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics Society, IECON. Raleigh, NC, USA; IEEE, 2005; 1-6.
- [10] RAHIMI M, PARNIANI M. Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2):514-525.
- [11] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真
  [J]. 电力自动化设备,2010,30(6):20-24.
  ZHU Ying,LI Jianlin,ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):20-24.
- [12] 凌禹,高强,蔡旭. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):18-23.
  LING Yu,GAO Qiang,CAI Xu. Pitch-controlled and crowbar control for low-voltage ride-through improvement in doubly fed induction generators wind turbines[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):18-23.
- [13] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):127-130.
  MA Wenlong. Application of crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7): 127-130.
- [14] 张学广,徐殿国. 电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(1):99-103.
   ZHANG Xueguang,XU Dianguo. Research on control of DFIG

with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control,2009,13(1):99-103.

- [15] ZHANG Wei,ZHOU Peng,HE Yikang. Analysis of the by-pass resistance of an active crowbar for doubly-fed induction generator based wind turbines under grid faults[J]. International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS. Wuhan, China:[s.n.],2008:2316-2321.
- [16] 马祎炜,俞俊杰,吴国祥,等.双馈风力发电系统最大功率点跟 踪控制策略[J]. 电工技术学报,2009,24(4):202-208.
  MA Yiwei,YU Junjie,WU Guoxiang,et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(4):202-208.
- [17] LING Yu,CAI Xu. Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2013, 44 (1):17-24.
- [18] MORREN J, de HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. IEEE Tran-

sactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):174-180.

Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.

[19] 贺益康,周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报,2009,24(9):140-146.
 HE Yikang,ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China

#### 作者简介:



凌 禹(1975-),男,山西阳高人,讲师, 博士,主要从事电力电子及其在电力系统中 的应用、电机及其控制和风力发电等方面的 研究(E-mail:pleasurely@126.com);

蔡 旭(1964-),男,江苏徐州人,教授, 博士研究生导师,研究方向为风力发电。

# Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor

LING Yu<sup>1,2</sup>, CAI Xu<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China;

2. WPRC, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract**: Aiming at the out-of-control problem of the crowbar protection method for DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind turbines, an FRT (Fault Ride-Through) scheme combining RSDR (Rotor Series Damping Resistor) and DC-side chopper is proposed, which meets the requirements of grid for FRT while suppresses the quick increase of generator speed to improve the speed stability and transient behaviors of unit. The theoretical basis of RSDR is analyzed, the influence of RSDR on system transient performance is discussed, and the optimal resistance is determined. The operating principle of the proposed scheme is analyzed and its effectiveness is verified by PSCAD/EMTDC simulation software. The simulative results show that, the proposed scheme ensures the DFIG wind turbine a successful low-voltage FRT with better speed stability and transient performance.

Key words: doubly-fed induction generator; fault ride-through; wind power; rotor series resistor; DC-side chopper; control

(上接第 24 页 continued from page 24)

# Wind power accommodation capability considering economic constraints for western mountain areas

LIU Wenxia, LI Yingzhi, LI He, ZHAO Tianyang, ZHANG Jianhua

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The cost benefits of both wind farm and grid caused by the integration of wind power into grid, as well as the environmental benefit, are quantitatively analyzed, and an optimization model of wind power accommodation is built, which takes the economical efficiency as its objective and considers the constraints of profitability and operational security. The differential evolution algorithm is adopted to solve the model. With RTS79 as an example, the proposed wind power planning method is compared to the traditional one, which considers only the technical factors, and analysis indicates that, the proposed method has smaller wind power accommodation capability but better economy, verifying its effectiveness and practicability.

**Key words**: wind power; cost-benefit analysis; environmental benefits; wind power accommodation capability; differential evolution algorithm; optimization; models; economic analysis

30